ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-88-525

УДК 530.145

ШЕВЧЕНКО
Олег Юрьевич

КАЛИБРОВОЧНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ И ВТОРИЧНЫЕ КАЛИБРОВОЧНЫЕ УСЛОВИЯ В ТЕОРИИ ПОЛЯ

Специальность 01.04.02 - теоретическая и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Дубна 1988

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
доцент

И.Л. Соловцов

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
профессор

Л.В. Прохоров

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

С.В. Трошин

Ведущая организация : НИИЯФ МГУ, Москва

Защита диссертации состоится ____________ 1988 г. на заседании специализированного совета К 047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " ____________ 1988 г.

Ученый секретарь совета
кандидат физико-математических наук

А.Е. Дорохов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

На сегодняшний день считается, что наиболее адекватное описание физики элементарных частиц дает теория калибровочных полей. На ее основе, в частности, строятся такие важнейшие физические неабелевы теоретико-полевые модели, как квантовая хромодинамика (КХД) и модель электрослабых взаимодействий. В квантовой хромодинамике, существенно использующей новое квантовое число – цвет кварка, впервые введенное в работе Боголюбова-Струминского-Тавхелидзе (1965), было обнаружено явление асимптотической свободы в ультрафиолетовой области. Это позволяет применять в ее рамках аппарат теории возмущений для расчета целого ряда физических процессов при высоких энергиях. Модель электрослабых взаимодействий, сформулированная Вайнбергом и Саламом (1967), приобрела в последние годы, благодаря обнаружению W – и Z –бозонов, статус общепризнанной теории.

Неабелевы калибровочные поля впервые были введены в работе Янга и Миллса (1954), в которой был обобщен принцип градиентной инвариантности квантовой электродинамики (КЭД) на случай векторных полей с изотопическими степенями свободы. На специфику квантования неабелевых калибровочных полей впервые было обращено внимание в работах Фейнмана (1963) и Де Вита (1964). Наиболее последовательный подход к квантованию безмассовых полей Янга-Миллса (используемых, в частности, в КХД), основанный на методе континуального интегрирования, был развит в работе Фаддеева и Попова (1967). Этот подход, благодаря механизму Хиггса, был практически без изменений перенесен т'Хоофтом (1971) на случай массивных калибровочных полей. Важнейшей чертой обсуждаемых теорий является их перенормируемость, которая была установлена в работах Славнова (1972), Тейлора (1971), Ли и Зин-Жюстена (1972), т'Хоофта и Вельтмана (1972).

Вместе с тем в калибровочных теориях поля существует ряд до сих пор не решенных проблем. К их числу следует отнести проблему описания непертурбативной, инфракрасной, области квантовой хромодинамики. В последние годы это направление интенсивно исследуется. Основными объектами изучения здесь являются полные функции Грина, описывающие распространение кварков и глюонов. В частности, изучается полный кварковый пропагатор $g(x,y)=i\langle 0|T\psi(x)\bar{\psi}(y)|0\rangle$. Интерес к таким исследованиям обусловлен тем, что отсутствие полюса у такого пропагатора в инфракрасной области может трактоваться как ненаблюдаемость (конфайнмент) кварка. Однако известно, что полные функции Грина, в частности пропагатор $g(x,y)$, являются калибровочно-зависимыми величинами. Поэтому исследование инфракрасной области КХД на языке этих функций Грина приводит к калибровочно-зависимым результатам. В этой связи представляется актуальной задача построения и изучения свойств калибровочно-инвариантных аналогов обычных функций Грина. Калибровочно-инвариантный кварковый пропагатор

$$G(x,y|C_{xy}) = i\langle 0|T\psi(x)\mathcal{P}\exp[ig\int_{C_{xy}} dz^\nu A_\nu(z)]\bar{\psi}(y)|0\rangle, \quad (1)$$

где $\mathcal{P}$ означает упорядочение по параметру контура интегрирования, соединяющего точки x и y, рассматривался во многих работах. Следует отметить, что проблема построения калибровочно-инвариантных динамических величин восходит к работам Дирака, Швингера, Мандельстама и других авторов.

Другая проблема, которая интенсивно изучается в теории калибровочных полей,- это проблема непротиворечивого использования калибровочных условий при квантовании полей Янга-Миллса. Действительно, проблема выбора условий, фиксирующих калибровку, представляющая на первый взгляд чисто технический вопрос, связанный с выбором наиболее оптимального способа расчета того или иного физического процесса, при переходе к неабелевым теориям оказывается сопряженной с рядом других проблем, приобретающих принципиальное значение (неоднозначности Грибова, проблема обхода полюсов, доказательство унитарности S-матрицы и т.д.). В этой связи следует отметить также проблемы столь широко используемого в КХД класса нековариантных ("аксиальных") калибровок $n^\mu A_\mu = 0$, интенсивное обсуждение которых вновь начато в связи с обнаруженным недавно расхождением результатов расчетов заведомо калибровочно-инвариантного объекта - петли Вильсона, проведенных в этом классе калибровок (при времениподобных выборах вектора n_μ), с результатами, полученными в кулоновской и фейнмановской калибровках (S. Caracciolo a.o. Phys. Lett., 1982, 113B, No 4, p.311-314).

<u>Цель работы</u> состоит в построении нового, свободного от отмеченных выше недостатков подхода к проблемам непротиворечивого квантования калибровочных полей, а также калибровочно-инвариантного описания инфракрасной области различных моделей теории поля.

<u>Научная новизна и практическая ценность</u>

Построен модифицированный метод квантования калибровочных полей методом функционального интеграла. Новые выражения для производящих

функционалов S-матрицы и функций Грина помимо δ-функции, обеспечивающей выполнение калибровки $n^\mu A_\mu = 0$, дополнительно содержат δ-функцию $\delta(\partial^i F_{i0}(A))$, обеспечивающую выполнение закона Гаусса под знаком функционального интеграла. Последнее обстоятельство приводит к тому, что полученный в диссертации новый векторный пропагатор, в отличие от обычного пропагатора в калибровке $n^\mu A_\mu = 0$, существенно различает пространственно- и времениподобные выборы вектора n_μ, что позволяет разрешить противоречие с калибровочной инвариантностью расчетов петли Вильсона, возникающее в стандартном подходе при выборе n_μ в виде времениподобного вектора.

В диссертации предлагается новый, следующий непосредственно из лагранжева формализма способ введения калибровочно-инвариантных контурно-зависимых динамических величин, в частности калибровочно-инвариантного спинорного пропагатора. Исследуется связь контурного произвола в этих величинах с калибровочным произволом в их калибровочно-зависимых аналогах. Сформулирован динамический критерий на выбор контура интегрирования в экспоненциальном факторе калибровочно-инвариантного спинорного пропагатора. Инфракрасная асимптотика этого пропагатора вычислена в рамках КЭД и $КХД_2$ моделей. Показано, что в электродинамике он имеет в инфракрасной области простой полюс (без нефизической точки ветвления). В то же время в рамках двумерной хромодинамики показывается, что в пределе восстановления трансляционной инвариантности калибровочно-инвариантного спинорного пропагатора его полюс отодвигается на бесконечность, что можно трактовать как конфайнмент изолированного кварка.

<u>Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации</u>:

1. Сформулирован критерий однозначной достижимости первичных калибровочных условий. Доказано существование и найден явный вид вторичных калибровочных условий, имеющих вид условия Лоренца, причем в случае самодействующих векторных полей обычные производные заменяются контурными производными Мандельстама. Введены новые калибровочно-инвариантные контурно-зависимые полевые переменные. Для них получены формулы обращения, устанавливающие связь векторного поля с тензором напряженности.

2. В ряде калибровочных моделей теории поля изучена инфракрасная асимптотика фермионного пропагатора, записанного в терминах однозначно достижимых полевых переменных. Сформулирован динамический критерий на выбор контура в криволинейном интеграле от векторных полей в спинорной функции Грина. Показано, что в случае прямолинейного контура спинорный пропагатор в инфракрасной области имеет простой полюс, а в

случае произвольного контура инфракрасные особенности аккумулируются в факторе, равном вакуумному среднему вильсоновского оператора.

3. В рамках $1/N$ -приближения вычислен калибровочно-инвариантный кварковый пропагатор в двумерной квантовой хромодинамике. Показано, что уравнение для него не требует дополнительной инфракрасной регуляризации. Установлено, что в пределе, который восстанавливает калибровочную и трансляционную инвариантность и отвечает переходу к однозначно достижимым полевым переменным, кварковый пропагатор не имеет особенности в любой конечной области, что обычно трактуется как конфайнмент кварка.

4. Предложен модифицированный метод квантования калибровочных теорий. Получены новые выражения для производящих функционалов функций Грина и S-матрицы, в которых под знаком континуального интеграла обеспечивается выполнение закона Гаусса.

5. В рамках предлагаемой схемы развит метод перехода от одной калибровки к другой в новом выражении для производящего функционала S-матрицы и доказана его калибровочная инвариантность на массовой поверхности. Найден новый вид пропагатора векторного поля, который по крайней мере в низших порядках теории возмущений не ведет к противоречиям в расчетах вильсоновской петли.

Апробация диссертации. Результаты, полученные в диссертации, докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, Отдела теоретической физики ИФВЭ и на УШ Международном семинаре по проблемам физики высоких энергий (Дубна, 1987 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав основного текста, заключения и трех приложений. Содержит 109 страниц текста и библиографический список литературы из 97 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан краткий исторический обзор создания аппарата теории калибровочных полей и описаны некоторые проблемы, стимулирующие его дальнейшее развитие.

Первая глава диссертации посвящена изучению аспектов классической теории полей Янга-Миллса. В главе исследуется проблема однозначного проектирования, налагающего на поле Янга-Миллса соответствующее первичное калибровочное условие. Для свободных векторных полей доказывается теорема - необходимое и достаточное условие единственности

проектора на векторное поле, заданное в соответствующей первичной калибровке вида $\Phi^{\mu}A^{\Phi}_{\mu}=0$. Доказывается теорема о существовании на уравнениях движения вторичного калибровочного условия, имеющего для свободных калибровочных полей вид условия Лоренца $\partial^{\mu}A^{\Phi}_{\mu}=0$. В общем случае самодействующих неабелевых полей вводятся новые калибровочно-инвариантные контурно-зависимые векторные поля, совпадающие с обычными (описываемыми обычной лагранжевой динамикой) полями Янга-Миллса, заданными в соответствующих калибровках лишь при частных выборах контура. Показано, что для этих полей имеют силу все соотношения КЭД, т.е. уравнения движения, формулы связи с калибровочно-инвариантным тензором напряженности, вторичное калибровочное условие и т.д., с заменой обычных производных на контурные производные Мандельстама.

Во второй главе диссертации предлагается новый, следующий непосредственно из обычного лагранжева формализма способ введения калибровочно-инвариантных контурно-зависимых динамических величин, в частности калибровочно-инвариантного спинорного пропагатора. Калибровочно-инвариантные функции Грина не постулируются, как обычно, а получаются из обычных с помощью соответствующего, не меняющего лагранжиана и уравнений движения проектирования, с контурно-зависимым проектором. Исследуется связь контурного произвола в калибровочно-инвариантных величинах с калибровочным произволом в соответствующих им калибровочно-зависимых аналогах. Формулируется динамический критерий на выбор контура интегрирования в экспоненциальном факторе калибровочно-инвариантного спинорного пропагатора. Согласно этому критерию пропагатор (I) приобретает независимый, вне связи с S-матрицей, физический смысл (с точки зрения придания физического смысла его особенностям) при выборе контура интегрирования C_{xy} в экспоненциальном факторе в виде отрезка прямой P_{xy}, соединяющего точки x и y.

Инфракрасная асимптотика калибровочно-инвариантного спинорного пропагатора (I) изучается функциональным методом - в электродинамике. Показано, что все его специфические, связанные с произволом выбора контура в экспоненциальном факторе, особенности в инфракрасной области аккумулируются в факторе, равном вакуумному среднему от вильсоновского оператора $W(L)$:

$$G(x,y/C_{xy})\simeq S_c(x-y)W(L),$$

где S_c - свободный спинорный пропагатор, контур L состоит из исходного контура интегрирования C_{xy} и отрезка прямой P_{yx}.
В случае же оправданного динамическим критерием выбора $C_{xy}=P_{xy}$ в

$G(x,y|C_{xy})$, этот пропагатор имеет простой полюс в инфракрасной области: $G(P) \simeq (\hat{P}-m)^{-1}$, $P^2 \simeq m^2$. Последний факт устанавливается как функциональным методом, так и на основе полученных в диссертации уравнений Дайсона-Швингера.

Исследуется проблема запирания цвета в рамках двумерной хромодинамики. В $1/N_c$ -приближении вычисляется инфракрасная асимптотика калибровочно-инвариантного кваркового пропагатора. Показывается, что этот пропагатор не имеет особенностей в любой конечной области. Показательным является тот факт, что в этих вычислениях не требуется введения вспомогательной инфракрасной регуляризации, необходимой для вычисления асимптотики обычного пропагатора. В качестве естественного регуляризующего параметра в вычислениях выступает параметр A восстановления калибровочной и трансляционной инвариантности динамических величин. Таким образом, предлагаемый подход свободен от неоднозначностей, связанных с различными способами инфракрасной регуляризации в калибровочно-неинвариантном формализме. Массовый оператор, отвечающий калибровочно-инвариантному пропагатору кварка в лидирующем порядке по A , имеет вид

$$M(P)=\frac{g^2}{\sqrt{2}}\,\frac{N-1}{N}\,A\,\mathrm{sgn}\,P,$$

и, следовательно, в пределе $A \to \infty$ полюс спинорной функции Грина уходит на бесконечность, что может трактоваться как конфайнмент отдельного кварка.

<u>В третьей главе</u> диссертации излагается модифицированный метод квантования полей Янга-Миллса, основанный на учете вторичных калибровочных условий. Показывается, что в результате корректного перехода из фазового пространства в конфигурационное производящие функционалы S -матрицы и функции Грина, в отличие от соответствующих стандартных выражений в кулоновской калибровке, содержат две функциональные δ -функции под знаком интеграла по калибровочному полю. Совмещение этих δ -функций, во-первых, обеспечивает одновременное выполнение условия Кулона и закона Гаусса (закона Гаусса со взаимодействием и закона Гаусса в свободной форме до и после перехода к режиму теории возмущений, соответственно) и, во-вторых, обеспечивает равенство числа независимых компонент векторного поля интегрирования числу физических степеней свободы калибровочного поля. В рамках предлагаемой схемы развивается метод перехода от одной калибровки к другой в полученном выражении для производящего функционала S -матрицы и доказывается его калибровочная инвариантность на массовой поверхности. Для всех линейных по калибровочному полю (первичных) калибровочных условий вида $\Phi^{\mu}A_{\mu}=0$, где оператор Φ_{μ} , в частности, можно выбрать в виде вектора n_{μ} , находятся новые выражения для производящих функционалов S -матрицы и функций Грина. Эти выражения помимо $\delta(\Phi^{\mu}A_{\mu})$ дополнительно содержат δ -функцию, обеспечивающую выполнение закона Гаусса под знаком функционального интеграла по векторному полю A_{μ} . Последнее обстоятельство приводит к тому, что

полученный в диссертации новый векторный пропагатор

$$\Delta^{(n)}_{\mu\nu}(k)=-\frac{i}{k^2}\Big\{g_{\mu\nu}-\frac{1}{(nk)}(k_\mu n_\nu+k_\nu n_\mu)+$$
$$+(\eta n)\frac{k^2}{(nk)[\eta^2k^2-(\eta k)^2]}(k_\mu\eta_\nu+k_\nu\eta_\mu)+$$
$$+\frac{1}{(nk)^2}\Big[n^2-(\eta n)^2\frac{k^2}{\eta^2k^2-(\eta k)^2}k_\mu k_\nu\Big]\Big\},$$

где $\eta\equiv(1,0,0,0)$, в отличие от стандартного пропагатора в калибровке $(nA)=0$, существенно различает пространственно-и времениподобные выборы направления вектора n_μ, что позволяет разрешить отмеченное выше противоречие с калибровочной инвариантностью расчетов петли Вильсона, возникающее в обычном подходе. Так, при выборе вектора n_μ , удовлетворяющем условию $(\eta n)=1$ (так же как и при выборе $n_\mu=ck_\mu$), что соответствует, в частности, "гамильтоновой" δ-образной калибровке $(nA)=(\eta A)\equiv A_0=0$, пропагатор $\Delta^{(n)}_{\mu\nu}$ переходит в обычный "кулоновский" пропагатор

$$\Delta^{(n)}_{\mu\nu}(k)\Big|_{(n\eta)=1}=\Delta^{(n)}_{\mu\nu}(k)\Big|_{n_\mu=ck_\mu}=-\frac{i}{k^2}\Big\{g_{\mu\nu}+\frac{k_\mu k_\nu-(\eta k)(\eta_\mu k_\nu+k_\mu\eta_\nu)}{(\eta k)^2-k^2}\Big\},$$

а не в стандартное выражение

$$\Delta^{(n)\,st}_{\mu\nu}(k)=-\frac{i}{k^2}\Big\{g_{\mu\nu}-\frac{n_\mu k_\nu+k_\mu n_\nu}{(nk)}+n^2\frac{k_\mu k_\nu}{(nk)^2}\Big\}.$$

В стандартное же выражение $\Delta^{(n)\,st}_{\mu\nu}$ пропагатор $\Delta^{(n)}_{\mu\nu}$ перейдет лишь при выборе вектора n_μ , удовлетворяющем условию $(n\eta)=0$. Однако именно в этом случае, который, в частности, соответствует δ -образной калибровке $A_3=0$, как раз и не возникает противоречия с расчетом петли Вильсона в других калибровках.

<u>В заключении</u> дан краткий перечень основных результатов, полученных в диссертации.

<u>В приложения</u> вынесен ряд технических вопросов.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Н.Б.Скачков, И.Л.Соловцов, О.Ю.Шевченко. Инфракрасная асимптотика калибровочно-инвариантного пропагатора. ТМФ, 1987, 71, № 1, с.54-66.
2. N.B.Skachkov, I.L.Solovtsov, O.Yu.Shevshenko. Gauge Invariant Formalism and Quarks Confinement in QCD_2. Z.Phys.C, Part and Fields, 1985, 29, No.4, p.631-635.
3. Н.Б.Скачков, О.Ю.Шевченко. Новый подход к проблеме квантования калибровочных полей. Труды УШ Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. ОИЯИ,Дубна,1986,Д1,2-86-668, с.21-34.
4. N.B.Skachkov, I.L.Solovtsov, O.Yu.Shevchenko. Gauge Invariant Field Variables and the Role of the Lorentz Gauge Conditions. JINR Rapid Communications,Dubna, 1985, No.8, p.42-46.
5. N.B.Skachkov, I.L.Solovtsov, O.Yu.Shevchenko. On the Gauge Invariant Variables For Non-Abelian Theories. JINR Rapid Communications,Dubna, 1985, No.9, p.39-42.
6. N.B.Skachkov, I.L.Solovtsov, O.Yu.Shevchenko. Infrared Asimptotics and Dayson-Schwinger Equations For the Gauge Invariant Spinor Green Function in Quantum Electrodynamics. JINR Rapid Communications, Dubna, 1985, No.10, p.13-17.
7. N.B.Skachkov, O.Yu.Shevchenko. The Lorents Conditions as a Secondary Gauge Condition and its Application for the Field Quantization. JINR Rapid Communications,Dubna,1987,No.3(23),p.17-22.
8. A.N.Sissakian, N.B.Skachkov, I.L.Solovtsov, O.Yu.Shevchenko. Infrared Singularities of Fermion Propogator and their Connection with the Wilson Loop. JINR Rapid Communications,Dubna,1987,No.3, p.12-16.
9. N.B.Skachkov, O.Yu.Shevchenko. Secondary gauge conditions, in field theory: Preprint E2-87-368, Dubna: JINR, 1987.
10. А.Н.Сисакян, Н.Б.Скачков, И.Л.Соловцов, О.Ю.Шевченко. Калибровочно-инвариантный подход и инфракрасное поведение спинорного пропагатора. Препринт ОИЯИ, Р2-87-479, Дубна, 1987.
11. А.Н.Сисакян, Н.Б.Скачков, О.Ю.Шевченко. Квантование калибровочных полей с учетом вторичных калибровочных условий. Вторичные условия в конфигурационном и фазовом пространствах. Препринт ОИЯИ, Р2-87-728, Дубна, 1987.
12. А.Н.Сисакян, Н.Б.Скачков, О.Ю.Шевченко. Квантование калибровочных полей с учетом вторичных калибровочных условий. Калибровки вида $\varphi^\mu B_\mu = 0$. Препринт ОИЯИ, Р2-87-729, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 июля 1988 года.